

文章编号:1005-6122(2006)06-0055-04

# 一种多模微带方形贴片带通滤波器的设计\*

邓 哲 程崇虎 朱洪波

(南京邮电学院无线通信与电磁兼容实验室,南京 210003)

**摘要:** 提出了一种多模方式工作的微带方形贴片带通滤波器。通常设计微带方形贴片滤波器主要是利用  $\text{TM}_{1,0,0}$  和  $\text{TM}_{0,1,0}$  这一对简并主模实现单模或双模的工作方式。但是这些滤波器尚存一些有待完善的地方,诸如带内插损偏大,带宽受限等等。本文设计的带通滤波器不使用主模,而是利用三个高次模分量,通过一种简单的微扰方式和馈电方式激励起除简并主模以外的三个高次模分量,并使之相互耦合实现通带。仿真和测量结果充分说明,这种滤波器能够实现宽频段的通带响应,并且在通带内具有很低的插损和良好的阻抗匹配特性,能够广泛地适用于微波平面电路。

**关键词:** 微带滤波器,多模滤波器,贴片谐振器

## Design of A Multi-Mode Microstrip Square Patch Bandpass Filter

DENG Zhe, CHENG Cong-hu, ZHU Hong-bo

(Laboratory of Wireless Communication and EMC, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** A multi-mode microstrip square patch bandpass filter is proposed in this paper. Usually, the microstrip square patch filters are designed using a pair of fundamental degenerate modes  $\text{TM}_{1,0,0}$  and  $\text{TM}_{0,1,0}$  to realize single-mode or dual-mode operation. But these filters have deficiencies such as high insertion loss, narrow bandwidth limit, and so on. The bandpass filter in this paper is designed using three higher modes instead of fundamental modes. A simple perturbation and feed scheme is employed to excite three higher modes. By adjusting the coupling between these modes, a novel bandpass filter is designed. Calculated and measured results are presented. It is observed that the filter has a wide passband, in which extremely low insertion loss and good matching can be achieved. So this filter may be widely used in microwave planar circuits.

**Key words:** Microstrip filters, Multi-mode filters, Patch resonators

## 引言

无线通信的飞速发展促使射频收发系统对微波滤波器的设计<sup>[1]</sup>要求日益提高。微带贴片滤波器<sup>[2]</sup>因具有尺寸小、重量轻、成本低、易加工等优点,在微波平面电路和微波集成电路(MIC)中得以广泛应用。微带贴片谐振器的固有特性使滤波器的设计非常简便灵活,而且双模谐振器还可以使滤波器的固有阶数减少一半,因而能够减小尺寸,使结构紧凑。

三角形<sup>[3]</sup>、方形<sup>[4,5]</sup>、方环<sup>[6]</sup>、圆面<sup>[7]</sup>、圆环<sup>[8]</sup>、折线环<sup>[9]</sup>等具有对称结构形式的微带贴片谐振器都有一对简并主模,可以被灵活地用于天线<sup>[10]</sup>和滤波器的设计。此前有一些文献分别设计出了各种各样的单模或双模工作的滤波器<sup>[3-9]</sup>。从这些滤波器的实际性能来看虽然也较为满意,但是还存在一些不足之处有待

改进。例如通带内插损普遍偏大,因而不适于多阶谐振器级联的应用;而且由于工作模式较少,它们的相对带宽都低于 10%,因此从带宽的角度而言,都属于窄带滤波器(相对带宽 < 20%)。

方形微带贴片谐振器中除了存在  $\text{TM}_{1,0,0}$  和  $\text{TM}_{0,1,0}$  这一对简并主模外,还存在一些高次模分量<sup>[11]</sup>。如果能够通过一种恰当的微扰方式和馈电方式把包括高次模在内的多种模式有效地激励起来相互耦合设计滤波器,将有可能实现更宽的通带响应和更优异的性能。基于这种思想,本文以微带方形贴片谐振器为研究对象,在其模式特点进行分析的基础上,通过在方形贴片表面沿对角线开一条窄缝这种微扰方式的引入,同时设置角馈的馈电方式来改变其各种模式的谐振频率。把除一对简并主模以外的三个高次模分量适当地耦合在一起设计出了带通滤波器,进行了

\* 收稿日期:2004-12-27;定稿日期:2005-06-06

仿真实验和实际测量。计算与实测结果均表明,这种结构的滤波器具有宽带频率响应(相对带宽>20%),而且通带内插损很小,匹配性能良好,相比与已有的设计结果具有一定的优点。该类滤波器完全适用于常规的微波平面电路,在高温超导(HTS)材料滤波器设计中<sup>[12]</sup>具有更加诱人的应用前景。

## 1 微带方形贴片谐振器的模式分析

根据 Wheeler 的腔模型<sup>[13]</sup>,对于  $xy$  平面上边长为  $a$  的方形贴片谐振器,上下面是电壁,四周表面是磁壁,因而纵向分量  $H_z = 0$ 。谐振器内部的场分量表达式符合下式:

$$\begin{aligned} E_z &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{a}y\right) \\ H_x &= \left(\frac{j\omega\epsilon_{\text{eff}}}{k_c^2}\right) \left(\frac{\partial E_z}{\partial y}\right), H_y = -\left(\frac{j\omega\epsilon_{\text{eff}}}{k_c^2}\right) \left(\frac{\partial E_z}{\partial x}\right) \quad (1) \\ k_c^2 &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \end{aligned}$$

其中  $A_{mn}$  是模式对应的幅度,  $\epsilon_{\text{eff}}$  是微带板材的有效介电常数。由波型指数  $m$  和  $n$  决定的任一模式的谐振频率可由(2)式求解。

$$f_{mn0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon_{\text{eff}}} \left( \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \right)} \quad (2)$$

因此,对于任一给定尺寸的微带方形贴片谐振器,它所包含模式的谐振频率点都能够据此计算出来。这其中既包括  $\text{TM}_{1,0,0}$  和  $\text{TM}_{0,1,0}$  这一对简并主模,也有  $\text{TM}_{1,1,0}$ 、 $\text{TM}_{0,2,0}$ 、 $\text{TM}_{1,2,0}$  等高次模分量。在已有的设计中都是利用了一对简并主模,并没有考虑丰富的高次模分量。

## 2 多模微带方形贴片滤波器的设计

微带方形贴片谐振器无论是用于天线还是滤波器的设计,本质都是对各种模式的选择和利用。微扰方式的引入和端口馈电方式的设置能够改变谐振器中各模式的固有谐振频率,使其中一些模式的谐振频率点发生搬移,一些模式之间产生相互耦合作用。如果通过一种特定的微扰方式和馈电方式能够把多种模式包括高次模分量有效地耦合在一起,同时又能把其它模式搬移至间隔较远的频率处,则可以实现比单模和双模工作方式的滤波器更宽的通带,并且可能取得更好的性能。

基于这种思想,本文对微带方形贴片谐振器提出了一种特定的微扰方式,沿对角线开一条长为  $L$  宽为  $d$  的窄缝。输入输出端口的设置采用角馈的馈

电方式,其特性阻抗为  $50\Omega$ 。滤波器的结构示意图如图 1 所示,实际设计中所使用的方形贴片边长  $a$  为 14.1 mm。

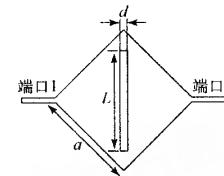


图 1 多模微带方形贴片滤波器结构示意图

为了研究缝长  $L$  和缝宽  $d$  的尺寸对各种模式谐振频率特性的影响,借助 IE3D 仿真软件进行了分析。可以发现,随着缝长的伸长和缝宽的加宽, $\text{TM}_{1,0,0}$  和  $\text{TM}_{0,1,0}$  这一对简并主模的谐振频率逐渐向低端偏移,见表 1。

表 1 简并主模随缝隙参数变化的关系

$L$ (mm)	$d = 0.5$ mm	$L = 0.5$ mm	
	谐振频率(GHz)	$d$ (mm)	谐振频率(GHz)
10	2.16	0.2	1.50
12	1.98	0.4	1.46
14	1.80	0.6	1.42
16	1.62	0.8	1.40
18	1.44	1.0	1.37
19	1.37	1.2	1.35

$\text{TM}_{1,1,0}$ 、 $\text{TM}_{0,2,0}$  和  $\text{TM}_{1,2,0}$  三个高次模的谐振频率随  $L$  和  $d$  的变化关系分别如图 2、图 3 所示。当保持缝宽  $d = 0.5$  mm 不变时,缝长  $L$  的增加导致  $\text{TM}_{1,1,0}$  模的谐振频率  $f_{1,1,0}$  上升,而  $\text{TM}_{0,2,0}$  模的谐振频率  $f_{0,2,0}$  呈现下降趋势,两者相互靠拢,故它们之间的耦合逐渐增强;当保持缝长  $L = 18$  mm 不变仅改变缝宽时,随着  $d$  的减小,  $f_{1,1,0}$  逐渐上升,  $f_{0,2,0}$  逐渐下降,两个模式的谐振频率在  $d = 0.2$  mm 时恰好重合。而在上述两种尺寸参数变化情况下,  $\text{TM}_{1,2,0}$  模的谐振频率  $f_{1,2,0}$  的变化范围都不大。

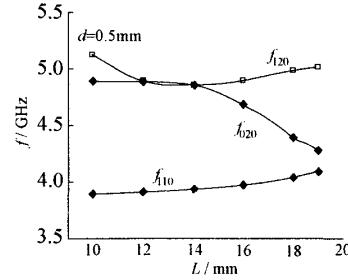


图 2 三个高次模的谐振频率随缝长  $L$  的变化关系

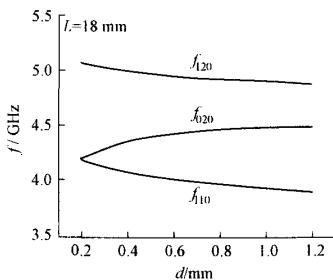


图3 三个高次模的谐振频率随缝宽d的变化关系

为了利用这三个高次模分量实现宽频段的通带,一方面需要这三个模式的谐振频率点比较靠近,相互有较紧密的耦合;另一方面还要使简并主模的谐振频率与它们的间隔尽量远。综合这些因素确定缝长和缝宽的取值,最终设计的具体尺寸为 $a = 14.1\text{mm}$ , $L = 18\text{mm}$ , $d = 0.5\text{mm}$ 。全部电路制作在相对介电常数为16,厚度1mm的陶瓷介质基板上,采用HP8720矢量网络分析仪进行测量。实物照片如图4所示,可以看出该滤波器结构非常紧凑。仿真和测量的频率响应曲线如图5所示。

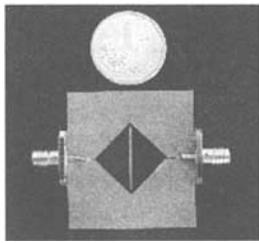


图4 滤波器的实物照片

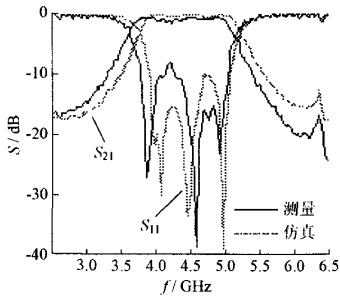


图5 滤波器的仿真与测量频率响应曲线

从图5中可以看出,仿真结果与测量结果吻合较好。以4.4GHz为中心频率有一个比较平坦的通带,通带范围是3.7~5.0GHz,绝对带宽为1.3GHz,相对带宽为29.9%,远远高于现有双模滤波器的带宽,属于宽带滤波器。从测量得到的 $S_{11}$ 曲线可以看出在3.86GHz、4.58GHz和4.91GHz处存在三种模

式的谐振频率点,分别对应于 $\text{TM}_{1,1,0}$ 、 $\text{TM}_{0,2,0}$ 和 $\text{TM}_{1,2,0}$ 三个高次模分量。

通常内插入损耗的仿真最小值为0.3dB,包括两端SMA接头损耗在内的实际测量最小值为0.6dB。两者的误差主要来源于微带线的导体损耗、介质损耗和表面波色散。这种很低的损耗使得该滤波器能够满足一些对插损要求很高的设备和系统的应用,还有利于设计多阶级联的结构以产生传输零点。反射系数在整个通带内全部都不超过-10dB,表明能与外电路很好地匹配。测量得到的通带-阻带过渡段的低端带外抑制能力比仿真结果略差,高端性能则优于仿真结果。虽然这种滤波器在整个频段内也有简并主模和更高次模等分量的存在,但是频率间隔都能保持在2.2GHz以上,因此所受的影响已经很小。上述性能分析充分说明,这种宽带滤波器完全适用于常规的微波平面电路和微波集成电路。

### 3 结论

本文在对微带方形贴片谐振器进行模式分析的基础上,提出了一种多模工作方式的微带方形贴片带通滤波器。通过一种特定的微扰方式和馈电方式激励起除简并主模以外的三个高次模,使之相互耦合实现带通滤波器。仿真和测量结果充分说明,这种滤波器能够实现比双模微带谐振器滤波器更宽的通带响应,而且在通带内具有很低的插损和良好的匹配特性,因而可以在微波平面电路的设计中广泛使用,同时在高温超导(HTS)工艺中具有更加诱人的应用前景。本文的设计方法也说明了在滤波器的设计中可以对谐振器的各种模式进行简易、灵活的选择和利用,从而满足不同的需要。

**致谢** 在此次工作中,同实验室的吕文俊博士提供了许多有益的建议和帮助,作者特此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Ralph Levy, Richard V Snyder, George Matthaei. Design of microwave filters. IEEE Transactions on MTT, 2002, 50 (3) : 783 ~ 793
- [2] Hong Jia-sheng, Lancaster M J. Microstrip Filters for RF Microwave Applications. New York: John Wiley & Sons, 2001
- [3] Hong J S, Li Shu-zhou. Theory and experiment of dual-mode microstrip triangular patch resonator and filters. IEEE Transactions on MTT, 2004, 52 (4) : 1237 ~

1243

- [4] Zhu Lei, Pierre-Marie Wecowski, Ke Wu. New planar dual-mode filter using cross-slotted patch resonator for simultaneous size and loss reduction. *IEEE Transactions on MTT*, 1999, 47 (5) : 650 ~ 654
- [5] Cassinese A, Andreone A, Barra M, et al. Dual mode superconducting planar filters based on slotted square resonators. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11 (1) : 473 ~ 476
- [6] Hong J S, Lancaster M J. Bandpass characteristics of new dual-mode microstrip square loop resonators. *Electronics Letters*, 1995, 31 (11) : 891 ~ 892
- [7] Curtis J A, Fiedziuszko S J. Miniature dual mode microstrip filters. *IEEE MTT-S Dig*, 1991, 2: 443 ~ 446
- [8] Wolff I. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator. *Electronics Letters*, 1972, 8 (12) : 302 ~ 303
- [9] Hong J S, Lancaster M J. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a novel meander loop resonator. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1995, 5 (11) : 371 ~ 372
- [10] Vasistha P, Vishvakarma B R. Some studies on microstrip square patch stacked antenna with 90° hybrid feed for dual band operation. *Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings*, 1998 (8) : 341 ~ 344

- [11] Preston W, Kawthar A Zaki. Analysis of the four basic resonant mode types of an enclosed rectangular microstrip patch including the effects of coupling between patches. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993, 29 (2) : 1656 ~ 1659
- [12] Terrell J, Riley T. High temperature superconducting filters – a maturing technology. *Military Communications Conference Proceedings*, 1999, 1 (3) : 389 ~ 392
- [13] Wheeler H A. Transmission-line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane. *IEEE Transactions on MTT*, 1977, 25 (8) : 631 ~ 647

**邓哲** 1980年生,南京邮电学院电磁场与微波技术专业硕士研究生。主要研究方向为微波无源电路的设计。

E-mail: deng\_zhe@163.com

**程崇虎** 南京邮电学院教授,主要研究方向为移动通信与无线射频技术、天线理论与设计等。

**朱洪波** 南京邮电学院研究生部主任,教授、博士生导师。目前主要研究方向为无线通信与电磁兼容、无线信道与通信干扰、电磁传输理论等。

(上接第 39 页)

- [2] Song C T P, Hall P S. Fractal stacked monopole with very wide bandwidth. *Electronics Letters*, 1999, 35 (12) : 945 ~ 946
- [3] Puente-Baliarda C, Romeu J, Pous R. On the behavior of the Sierpinski multiband fractal antenna. *IEEE Trans on Antenna Propagation*, 1998, 46 (4) : 517 ~ 524
- [4] Puente C, Romeu J, Cardama A. The Koch monopole: a small fractal antenna. *IEEE Trans on Antenna Propagation*, 2000, 48 (11) : 1773 ~ 1783
- [5] Puente C, Romeu J, Pous R. Small but long Koch fractal monopole. *Electronics Letter*, 1998, 34 (1) : 9 ~ 10
- [6] Douglas H, Randy L. Fractal antenna engineering: the theory and design of fractal antenna arrays. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1999, 41 (5) : 37 ~ 59
- [7] John P Gianvittorio, Yahya Rahmat-Samii. Fractal antennas: a novel antenna miniaturization technique and applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44 (1) : 20 ~ 35

**张辉** 女,1982年生,国防科技大学电子科学与工程学院在读博士研究生,主要从事微带天线、分形天线、光子晶体等方面的研究。

E-mail: huihuigirlsd@tom.com

**付云起** 男,1975年生,于2004年在国防科技大学电子科学与工程学院获得博士学位,现任国防科技大学副教授,主要从事微带天线、光子晶体等方面的研究。

**朱畅** 男,1978年生,于2006年在国防科技大学电子科学与工程学院获得博士学位,现任国防科技大学讲师,主要从事微波毫米波电路等方面的研究。

**袁乃昌** 男,1965年生,国防科技大学电子科学与工程系主任、教授、博士生导师、中国电子学会高级会员,中国电子学会雷达分会天线专委会委员,八六三308主题发展战略研究组成员,美国Advanced Science协会会员,美国纽约科学院院士。先后在 IEEE - MTT、IEE Proceeding - H、电子学报等国内外刊物上发表论文60余篇,出版专著2本。主要研究领域为微波毫米波电路、相控阵天线、电磁散射及超宽带技术等。

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>